



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**VYUŽITÍ PÁJEK S VYŠŠÍ TEPLOTOU TAVENÍ U
HYBRIDNÍCH INTEGROVANÝCH OBVODŮ**

USAGE OF SOLDERS WITH HIGHER MELTING POINT FOR HYBRID INTEGRATED CIRCUITS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Janda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Ondřej Janda

ID: 183954

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Využití pájek s vyšší teplotou tavení u hybridních integrovaných obvodů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zabývejte se použitím tvrdých pájek pro tlustovrstvé struktury využívané u hybridních integrovaných obvodů. Vytvořte experimentální pájecí nástroj pro tvrdé pájení. Navrhněte předpis pro zajištění opakovatelnosti u procesu pájení tvrdé pájky, kterou jste zvolil v semestrálním projektu, s využitím Vámi vytvořeného pájecího nástroje. Předpis použijte pro vytvoření vzorků, které následně podrobte destruktivním zkouškám tahové síly. Výsledky popište a vyhodnoťte ve své závěrečné práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 31.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce seznamuje s problematikou pájení, vysvětluje základní děje a principy ovlivňující tvrdé pájení a poukazuje na jejich pozitivní i negativní projevy. Současně se snaží naznačit řešení těchto negativních projevů doprovázejících tvrdé pájení. V praktické části je popsán postup návrhu testovacích substrátů, metodologie testování a optimalizace pájecího procesu. Také je zde popsán návrh a výroba pájecích nástrojů pro tvrdé pájení s přenosem tepla vedením.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tlustá vrstva, tvrdé pájení, odsmáčení tlusté vrstvy

ABSTRACT

Bachelor thesis introduces the problematics of soldering, explains basic phenomena and principles affecting brazing and points out their positive and negative outcomes, as well as trying to suggest solutions to those negative symptoms accompanying the brazing. Practical part describes a design procedure of the test substrates, methodology of mechanical tests and optimalization of brazing process. As a part of the research, a design and construction of a various brazing tools with heat transfer through a conduit, is included.

KEYWORDS

Thick film, brazing, leaching

JANDA, O. *Využití pájek s vyšší teplotou tavení v hybridních integrovaných obvodech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2018. 52 s. Bakalářské práce. Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Využití pájek s vyšší teplotou tavení v hybridních integrovaných obvodech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 31. května 2018

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Alexandru Otáhalovi. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 31. května 2018

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	6
Teoretická část	7
1 Tlustovrstvá technologie	7
1.1 Nosný substrát.....	7
1.2 Tlustovrstvé pasty	8
2 Pájitelnost	10
2.1 Smáčivost.....	11
2.2 Leaching.....	13
3 Tvrdé pájení	14
3.1 Tvrdé pájky	14
3.1.1 Tvrdé pájky na bázi stříbra	14
3.1.2 Pájka na bázi Ag – Cu – Zn	16
Praktická část	17
4 Použité přístrojové vybavení	19
4.1 Sítotiskový poloautomat AUREL C880 Screen Printer	19
4.2 Sušárna Memmert UF 75	19
4.3 Průběžná vypalovací pec BTU BUCR – 1.....	19
4.4 Laboratorní proudový zdroj HCS	19
4.5 Keramická topná deska CT 10.....	20
4.6 Měřič síly v tahu TEST 321.....	20
5 Návrh testovacího motivu	21
6 Návrh měděného pájecího nástroje	25
7 Výroba měděného pájecího nástroje	27
8 Pájecí nástroj z nitridové keramiky	31
9 Pájecí nástroj z nerezového materiálu	32

10 Pájecí proces a testování	33
10.1 Návrh testování	33
10.2 Pájecí proces	35
10.3 Tepelný test.....	40
Závěr	41
Literatura	42
Seznam obrázků	44
Seznam tabulek	46
Seznam vzorců	47
Seznam symbolů, zkratek a veličin	48

ÚVOD

Hybridní integrované obvody (HIO) jsou vytvářeny spojením aktivních součástek a tenkovrstvé nebo tlustovrstvé technologie, kterou vytváříme pasivní součástky. Obvod je na závěr uzavírán do pouzdra, kvůli mechanické, chemické i teplotní ochraně. Výsledné obvody mají širokou škálu uplatnění.

Součástí výroby HIO je i realizování vývodů, což je prováděno pájením, které je rozděleno na dva druhy, měkké a tvrdé, podle typu použité pájky. Tvrdé pájení znamená, že pájecí slitina má minimální teplotu tavení 450°C a více. Výsledné vývody mají především velmi dobré mechanické vlastnosti a jsou uzpůsobeny na větší výkonové zatížení. Na tyto vlastnosti jsou kladeny nároky hlavně v letectví, lékařství, vojenském průmyslu a kosmické technice. Bohužel vyšší teploty při pájení sebou přináší i negativní jevy. Jedním z těchto projevů je odsmačení (leaching), ke kterému dochází speciálně u tlustých vrstev, kdy dochází k rozpouštění pájeného kovu do pájky. Tomuto jevu lze částečně zamezit změnou délky procesu, teploty nebo typem použitého materiálu na pájku a pájecí plochy.

Bakalářská práce se zabývá optimalizací procesu tvrdého pájení na tlusté vrstvy. Praktická část se věnuje tvorbě nástroje, stanovení postupu pro proces pájení, teplotního profilu a zjištění vlastností výsledného pájeného spoje z pohledu pevnosti v tahu a teplotní zatížitelnosti.

TEORETICKÁ ČÁST

1 TLUSTOVRSTVÁ TECHNOLOGIE

Tlustovrstvá technologie představuje výrobu odporových, vodivých, dielektrických, izolačních a speciálních vrstev, které tvoří pasivní síť. Tyto sítě následně ve spojení s aktivními součástkami vytváří hybridní integrované obvody. Výsledný obvod lze pak ještě pro ochranu uzavřít do pouzdra.

Princip spočívá v nanesení materiálu s požadovanými vlastnostmi na nosný substrát. Materiály tvořící pasivní síť, jsou ve formě past natištěny pomocí sítotisku. Poté dochází k zasušení pasty a jejímu výpalu, neboli sintraci, při teplotách okolo 850 °C (teplota se odvíjí od typu pasty). [1]

1.1 Nosný substrát

Jako základové materiály pro HIO jsou používány anorganické substráty, které mají oproti organickým mnohem lepší vlastnosti, převážně tepelné, ale i mechanické a elektrické. Z tepelné stránky musí mít dobrou schopnost odvádět teplo vytvořené součástkami. Elektricky by měl být substrát schopen odizolovat vodivé cesty obvodu. Keramika má silné vazby mezi jednotlivými atomy, což zajišťuje tvrdost substrátu i při vysokých teplotách. Avšak odolnost keramiky proti ulomení nebo prasknutí je malá. Mezi další nevýhody patří hlavně vyšší cena a jejich horší opracovávání. Základní typy anorganických substrátů a srovnání jejich parametrů lze vidět v Tab. 1. [2]

Tab. 1 Srovnání vlastností anorganických substrátů [2,3,4,5]

	96 % Al ₂ O ₃	99,5 % Al ₂ O ₃	99 % BeO	AlN
Tepelná vodivost [J * s ⁻¹ * m ⁻¹ * K ⁻¹]	35	37	330	170
Součinitel teplotní roztlačnosti [ppm * K ⁻¹]	6,4	6,6	5	4,5
Elektrická pevnost [kV*mm ⁻¹]	8	9	14	12
Měrný odpor [Ω*mm]	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹³
Ztrátový činitel [při 1MHz]	0,55	0,08	0,04	9 - 20
Relativní permitivita [při 1MHz]	9	10	6,6	10
Maximální pracovní teplota [°C]	1700	1750	2050	740

Nejčastěji je pro TLV používána korundová keramika s obsahem 96 % až 99 % Al₂O₃, především je to díky její ceně a parametrům. Korundová keramika vydrží pracovní teploty od 1200 °C do 1700 °C (Tab. 1). Pro výkonové aplikace je možné využívat i oxid berylia (BeO) s několikanásobně lepší tepelnou vodivostí a vyšší pracovní teplotou. Hlavní nevýhoda beryliové keramiky je její toxicita, proto je využívána v menší míře. Její využití je hlavně u náročnějších aplikací, kde je potřeba vysoká spolehlivost. Nejvíce je používána v průmyslovém odvětví, jako je letectví nebo vojenská technika. Mezi další substráty patří silikon karbid (SiC) a nitrid boru (BN). Silikon karbid je dobře tepelně vodivý, s malým koeficientem teplotní roztlačnosti, a má i nižší cenu, ale jeho nevýhoda je pětikrát vyšší hodnota dielektrické konstanty. Také je používán nitrid hliníku (AlN) s dobrou chemickou odolností a velmi dobrou hodnotou koeficientu tepelné odolnosti. Koeficient tepelné odolnosti udává schopnost materiálu vydržet v krátké době velké teplotní šoky. [2,5]

Výsledný substrát je pak vyráběn ve formě destiček o různých rozměrech. Tloušťka začíná na 0,25 mm. Pro hybridní integrované obvody je nejpoužívanější tloušťka o velikosti 0,635 mm. Právě tloušťka substrátu je jeden z důležitých parametrů pro dobrý odvod tepla. [2]

1.2 Tlustovrstvé pasty

Další důležitou složkou HIO jsou pasty. Abychom mohli vytvořit výslednou pasivní síť

na substrátu, musíme znát složení a vlastnosti pasty, kterou budeme používat. Rozlišujeme 3 základní složky pasty:

Funkční složka – určuje základní charakter pasty, je tvořena práškem o velikosti částic okolo 5 μm . Složení prášku pak závisí na stylu použití, pokud potřebujeme vodivou pastu, tak využíváme drahé (stříbro, zlato, atd.) i obyčejné kovy a jejich možné slitiny a pro odporovou pastu jsou využívány oxidy. Pak jsou ještě speciální případy, jako například magnetické nebo termistorové pasty, které jsou složeny z předem připravených směsí. [1]

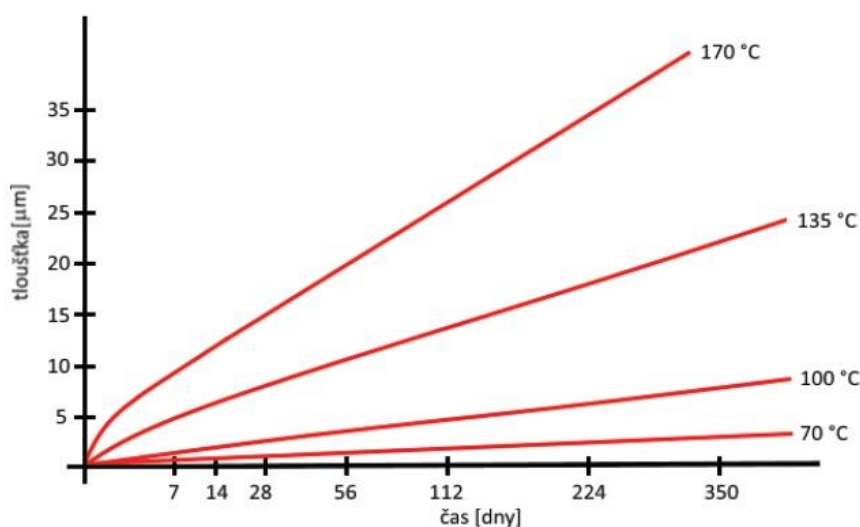
Tavivová složka – slouží na vytvoření vazby mezi funkční složkou a substrátem. Nejčastěji jsou používány nízkotavná skla, které měknou už od 600 °C. Při vypalování dojde ke změknutí této složky, ale ne k jejímu roztavení, aby mohla vzniknout nosná matrice funkční složky. Novinkou jsou pasty s oxidovou vazbou, která je vytvořena přídavným kovem. [1]

Pojivová složka – zajišťuje vlastnosti pro dobrý tisk, především viskozitu. Je složena z organických látek, jako jsou ředidla, organické složky a modifikátory. Během výpalu dochází k jejímu odpařování a ve výsledku nemá podíl na funkčnosti vrstvy. [1]

2 PÁJITELNOST

Aby bylo dosaženo kvalitního pájeného spoje, musí mít pájený materiál dobré vlastnosti, které určují jeho pájitelnost. Tato jeho vlastnost se liší s druhem materiálu, co používáme.

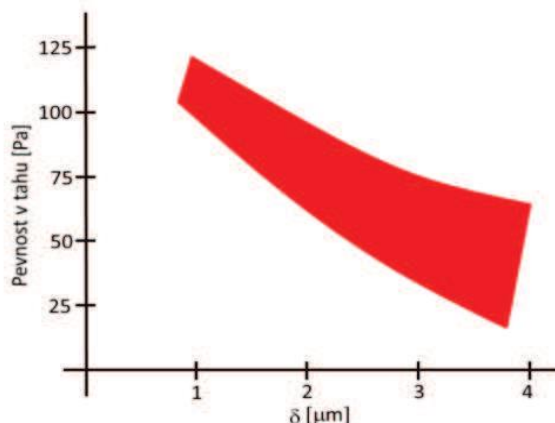
Důležitým parametrem je tvorba intermetalické sloučeniny. Pokud nedojde k vytvoření této vrstvy, tak nedošlo k dostatečnému propojení pájky s daným materiálem, vlivem tzv. metalurgické reakce. V praxi to znamená, že nejaktivnější prvek v pájce zreaguje s pájenou plochou a vytvoří tenkou vrstvu intermetalického materiálu. Roztavená pájka se rozpouští s dalšími kovy a ty mohou pak vytvořit nové fáze s krystalickou strukturou. Výsledná intermetalická vrstva je nejvíce ovlivněna teplotou a dobou, po kterou je pájka v roztaveném stavu. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na čase a teplotě lze vidět na Obr. 1. [6]



Obr. 1 Závislost velikosti intermetalické vrstvy na teplotě a čase. [6]

Z grafu (Obr. 1) je patrné, že čím větší je teplota pájení a doba po kterou pájíme, tak tím tlustší vrstva bude. Tvorba probíhá i následně po ztvrdnutí pájky, pomocí difuze, kde zase hraje velkou roli teplota. Tento růst pokračuje dále po celou dobu životnosti spoje.

Velikost intermetalické vrstvy by neměla být moc velká. Při použití malé množství pájky, může dojít k tomu, že by vytvořená vrstva byla větší než tloušťka pájky, což znamená, že pájený spoj má jiné vlastnosti než původní pájka. Nejčastěji to způsobí zhoršení pevnosti spoje, jelikož intermetalické sloučeniny bývají sice tvrdé, ale křehké. Pro znázornění lze vidět pevnost intermetalické vrstvy v závislosti na její tloušťce na Obr. 2.



Obr. 2 Pevnost intermetalické vrstvy v závislosti na její tloušťce [6]

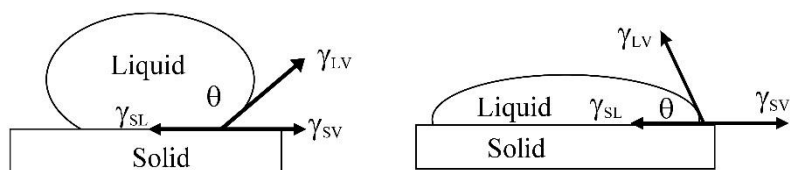
Lze z toho tedy vyvodit, že v případě, kdy bude teplota pájení nad 700°C dojde k tvorbě relativně silné vrstvy intermetalické sloučeniny a výsledný spoj by měl být velmi křehký. Tomu lze předejít, pomocí volby materiálů, které jsou vzájemně kompatibilní neboli s podobným složením. Pokud mají látky tvořící intermetalickou vrstvu přibližně stejné složení jako materiály použité při vytváření spoje, vytvoří se tak lepší koncentrační profil intermetalické vrstvy a tím pádem se budou méně lišit svými vlastnostmi, víc přibližovat pájce a základnímu materiálu. Pájený spoj si tak zachová svoji kvalitu i při větší tloušťce intermetalické vrstvy.

2.1 Smáčivost

Pájení je jednou z nejvíce používaných technik spojování v mikroelektronice, a proto je zajištění dobrých smáčivých podmínek mezi pájkou a ostatními částmi velmi důležité. Smáčivost je definována jako vlastnost tekuté pájky nebo tavidla přilnout k povrchu nebo plošky, který budeme spojovat. [7]

Při smáčení dojde k rozprostření kapky roztavené pájky do takového tvaru, ve kterém bude povrchová energie systému podklad, pájka, okolí co nejmenší. Při takovém rozložení působí meziatomové síly. Působením těchto sil vznikají na místě styku fáze vazby, které se postupně rozšíří do celé plochy styku. Současně se s tímto dějem sníží celková povrchová energie celého systému. Během smáčení dojde ke změně povrchu v mezifázovém rozhraní mezi podkladem a tekutou pájkou. Po vzniku fyzického kontaktu se začnou přesouvat atomy pájky do oblasti působení krystalografické mřížky podkladu. V této části hrají velkou roli kvantové procesy mezi atomy, hlavně přechody elektronů z vnějších valenčních vrstev. Když je vnější sféra nasycena elektrony, začne atom jevit sklon k přibírání cizích elektronů, pokud sféra není nasycena, tak atom odolává působení jiných atomů. Při působení atomů obou fází dojde ke slučování jejich elektronů a vytvoří se kovová vazba. Ve výsledku, pokud se v ploše styku mezi podkladem a pájkou

nevytvoří společné fáze, nedojde ani ke smáčení. Ukázku dobrého a špatného smáčení lze vidět na Obr. 3. [7]



Obr. 3 Znázornění špatné a dobré smáčivosti. [8]

Důležitým parametrem při smáčení je kontaktní smáčecí úhel θ , který je v místě styku mezi podkladem a pájkou. Podle úhlu pak lze rozpoznat stupně smáčivosti. Čím více se úhel θ blíží nule, tím je smáčení lepší, za podmínek, že $\theta = 0$ se jedná o úplnou smáčivost, při $\theta < 20^\circ$ velmi dobrou smáčivost, $20^\circ > \theta < 90^\circ$ dobrá smáčivost. Když je kontaktní úhel větší než 90° jde o špatnou smáčivost. [7]

Úhel θ lze vypočítat pomocí hodnot mezipovrchové energie mezi podkladem, pájkou a okolím pomocí následujícího vztahu [8]

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}}, \quad (1)$$

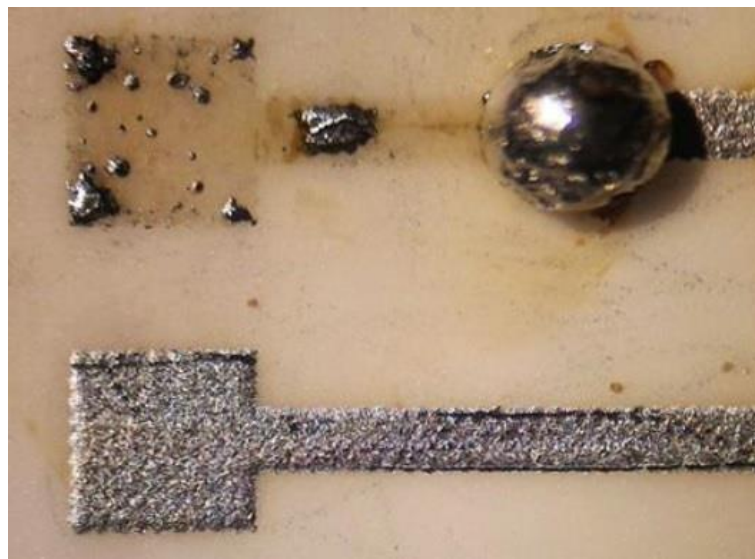
kde θ představuje smáčecí úhel, γ_{sl} je mezipovrchová energie mezi pájeným materiálem a pájkou (solid a likvid), γ_{sv} mezipovrchová energie mezi pájeným materiálem a okolní atmosférou (solid a vapor) a γ_{lv} mezipovrchová energie mezi pájkou a okolní atmosférou (likvid a vapor).

Smáčivost je pak kladně ovlivněna snížením mezipovrchového napětí, čehož lze dosáhnout legováním pájky, podkladu a dobrými pájecími podmínkami. Aby došlo ke smáčení tuhého podkladu s tekutou pájkou je potřeba dosáhnout minimální teploty, kterou označujeme jako smáčecí teplotu. U materiálů s dobrou tepelnou vodivostí jako je třeba měď nebo hliník, by měl mít pájený povrch stejnou teplotu jako je teplota solidu pájky, před stykem s roztavenou pájkou. Pro špatně vodivé materiály může být teplota pájení povrchu o 25 % menší, než je solidus pájky. Další parametr ovlivňující smáčivost je kvalita pájené plochy. Pokud se na povrchu pájené plochy nacházejí nějaké deformace, zlepšuje se smáčivost. [7]

Se smáčivostí se pojí ještě další pojem a to vzlínavost, která určuje vlastnost roztavené pájky zaplnit úzkou mezeru spoje pomocí kapilárních sil. Tyto kapilární síly jsou příčinou vzniku tzv. menisku, kdy je postupující pájka vlivem povrchového napětí zakřivena. Kapilární vzlínavost je pak závislá na typu použité pájky a na jejím povrchovém napětí. [7]

2.2 Leaching

Leaching neboli odsmačeni je jev, ke kterému dochází při pájení na tlusté vrstvě. Jedná se o rozpouštění pájeného podkladu od tekuté pájky. Rychlost odsmačeni je ovlivněna dvěma hlavními faktory, tím prvním jsou podmínky při pájecím procesu. Během pájení nastavujeme dva parametry, teplotu a délku pájení. Teplotu moc ovlivnit nemůžeme, jelikož příznivá pájecí teplota by měla být taková, aby došlo k roztavení celé pájky, tzv. několik stupňů nad teplotou likvidu. Doba pájení by pak měla být co nejkratší, aby došlo k vytvoření kvalitního spoje. Při delším pájení už je pravděpodobnost vytvoření horšího spoje. Výsledek odsmačeni tlustovrstvé stříbrné pasty do pájky lze pozorovat na Obr. 4. [9]



Obr. 4 Ukázka jevu leaching tlustovrstvé stříbrné pasty do pájky. [9]

Jako další faktor ovlivňující odsmačeni je zvolený materiál pájecí slitiny a pájeného povrchu. Tento faktor lze lépe ovlivnit. Správnou volbou materiálů můžeme dosáhnout snížení úrovně odsmačeni. Mezi nejspolehlivější způsoby patří přidání špatně odsmačitelného materiálu do pájecí plochy, jako je například indium nebo paladium. Při přidání těchto materiálů i v malém množství dochází ke snížení odsmačeni u tlusté vrstvy. Další způsob je pak zvýšení tloušťky nanášené vodivé vrstvy, čehož docílíme natisknutím více vrstev tlusté vrstvy. Oba tyto způsoby jsou finančně náročnější. [9]

K tomuto ději dochází i u desek plošných spojů. U DPS se používá jako vodivá cesta plátovaná a galvanicky nanášená měď, která je odolnější než materiály, které se používají u TLV (stříbro, zlato). Vrstva mědi je také tlustší, takže leaching není viditelný a nezpůsobuje reálný problém. [9]

3 TVRDÉ PÁJENÍ

Pájení je děj, při kterém spojujeme různé kovové součásti, mechanicky a elektricky, za pomoci pájky. Pájení lze dělit na dva druhy, měkké pájení, kdy používané pájky dosahují maximální teploty tavení likvidu a solidu 450°C a na tvrdé, které má teplotu tavení 450°C a více. [10]

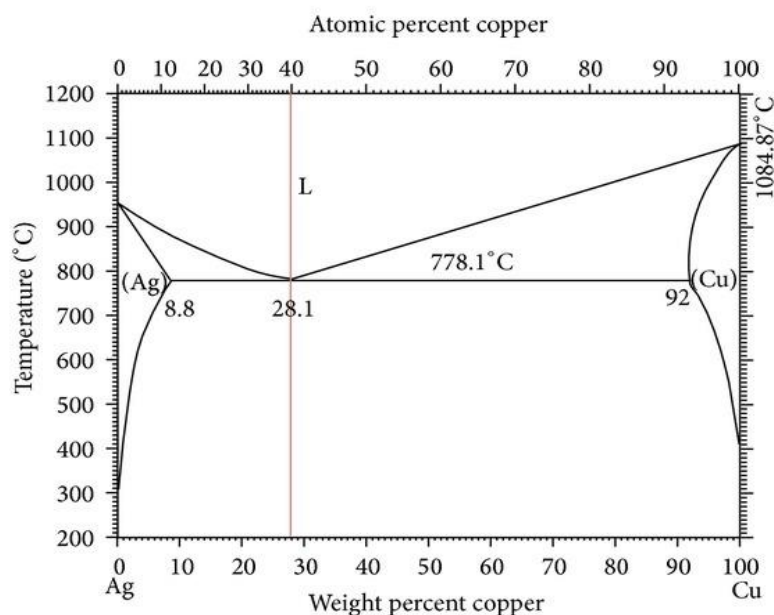
Pájení pak lze rozdělit ještě podle typu přenosu tepla buď vedením, radiací, nebo zářením, podle čehož se pak odvíjí způsob pájení. Mezi nejznámější způsoby patří pájení přetavením, vlnou, ruční pájení, laserem atd. Tato práce se zabývá ručním pájením pomocí vedení tepla. [10]

3.1 Tvrdé pájky

Tvrdé pájky jsou využívány pro spoje, které jsou více namáhané, ať už z hlediska mechanického zatížení nebo tepelného. Mezi hlavní složky tvrdých pájek patří jak obvyčejné, tak i drahé kovy. Jako nejčastější se pak používají pájky na bázi mědi, mosazi, zlata, stříbra a niklu. Při používání těchto materiálů se obvykle setkáváme s pracovními teplotami i nad 700°C , což je pak důvodem pro zmíněnou schopnost snášet vysoké zátěžové teploty. [7,10]

3.1.1 Tvrdé pájky na bázi stříbra

V bakalářské práci budou použity materiály, které jsou založené převážně na stříbře. Důvodem je také menší rozpouštění tlusté vrstvy na bázi stříbra v roztavené pájce. Samotné stříbro je relativně drahý kov, proto jsou stříbrné pájky výrazně dražší než mosazné i měděné. Jedním z důvodů, proč jsou tyto pájky používány je jejich nižší pájecí teplota. Čisté stříbro má teplotu tavení okolo 962°C , kdežto měď se pohybuje na 1085°C . Závislost teploty na koncentraci Ag a Cu je možné vidět na Obr. 5. [7]



Obr. 5 Diagram teplot slitin Ag – Cu [11]

Stříbro jako kov má často sklon oxidovat, proto je v pájkách smícháno s dalšími prvky, aby se zabránilo zoxidování pájky a současně snížila teplota pájení. I když je teplota tavení stříbra nižší než většina ostatních kovů v tvrdých pájkách, stále má dost vysokou teplotu. Tato vysoká teplota pájení společně s vyšší cenou stříbra tak zabraňují většímu rozšíření v průmyslu. Stříbro je nejčastěji používá v kombinaci s prvky jako je měď, zinek a kadmium, ale současně jsou v malé míře přidávány další prvky, převážně na snížení teploty pájení a zlepšení vlastností pájky. [7]

Působení prvků používaných na pájky s Ag bází:

- Sn – způsobuje snížení teploty tavení, ale zároveň zvyšuje křehkost pájky, doporučuje se maximální obsah v pájce do 0,1 %;
- Si – snižuje pórovitost a zároveň redukuje vypalování Zn v pájce;
- P – používáme při pájení mědi, kde působí jako deoxidační činidlo;
- Mn – vyšší pevnost v tahu spoje, ale snižuje ohybnost spoje;
- Ni – vylepšuje mechanické vlastnosti a zvyšuje antikorozi vlastnosti;
- Fe – lepší tvrdost pájeného spoje;
- Pd – společně s bismutem a beryliem zlepšují smáčivost pájky;
- Al – snižuje tekutost pájky, současně vytváří křehké intermetalické vrstvy;

- Sb – menší deformační vlastnosti spoje;
- Bi, Pb – zvyšuje křehkost a pórovitost spoje; [7]

3.1.2 Pájka na bázi Ag – Cu – Zn

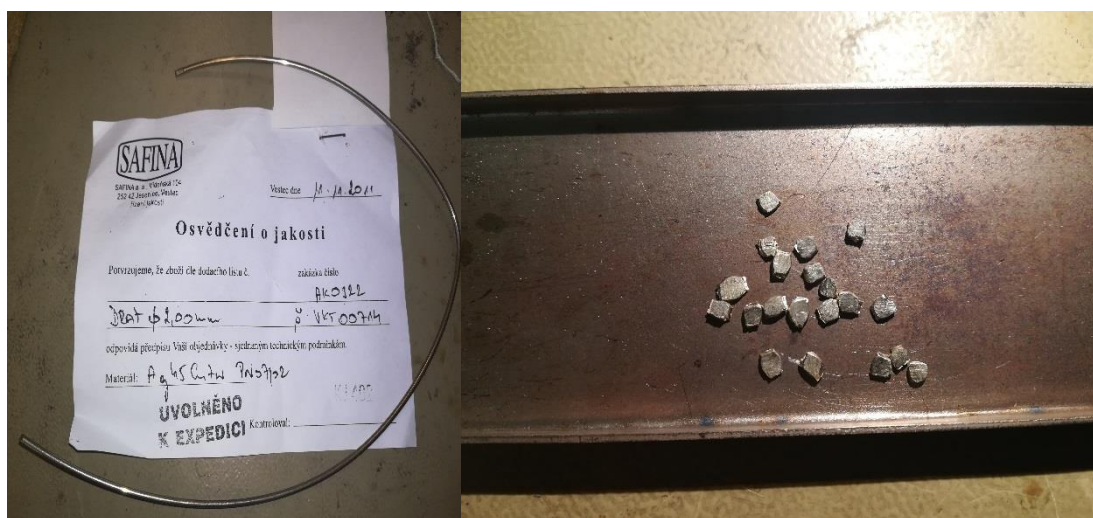
Speciálně je pak práce zaměřena na slitinu Ag-Cu s příměsí zinku. Pokud se zleguje slitina Ag-Cu zinkem klesne teplota likvidu směsi o 4,5 °C za každé 1 % stříbra. Bohužel při přidávání zinku se zvyšuje podíl intermediárních krystalů ve struktuře, které způsobují křehkost spoje. Například při složení Ag55-Cu15-Zn30 vznikne po zahřátí nad 677 °C potrojně eutektikum, ale toto složení se pro praktické použití nehodí, neboť by vytvořilo nespolehlivé spoje. Reálně se používají slitiny vytvářející pevnější spoje. Při malém obsahu stříbra by měl být poměr mezi Cu : Zn přibližně 60 : 40, u pájek s vyšší hodnotou obsahu Ag (30% až 66%) poměr Cu : Zn by měl být 2 : 1 a vyšší. Pájky pak mají teplotu tavení pohybující se od 740 do 840 °C. Tento druh pájek má nejvyšší pevnostní charakteristiky ze všech stříbrných pájek. Hodí se pro různé druhy metod pájení, jak železných, tak i neželezných kovů s použitím tavidla. Pokud se v pájce nachází vyšší množství Ag hodí se ke spojování měděných částí i nerezavějící oceli v elektrotechnice. Dále jsou používány v potravinářském průmyslu, kde je zakázáno používat toxické pájky obsahující kadmium. Pájky s malým zastoupením Ag (20% až 30%) se pak používají na spojování neželezných kovů s větší tloušťkou, ale mají větší interval teplot tavení. [7]

Pájka Ag45CuZn má heterogenní strukturu s teplotou likvidu/solidu pohybující se okolo 740/680 °C a je převážně eutektická, s jenom místně vyloučenými ostrůvky tuhého roztoku, který je bohatý na měď. Největší množství těchto ostrůvků je vyloučeno v místech styku se základním materiálem. Což je způsobeno selektivním způsobem tuhnutí pájky. Samotná pájka vytváří spoje s pevností od 180 do 370 MPa v tahu a 70 až 170 MPa ve smyku. [7]

PRAKTICKÁ ČÁST

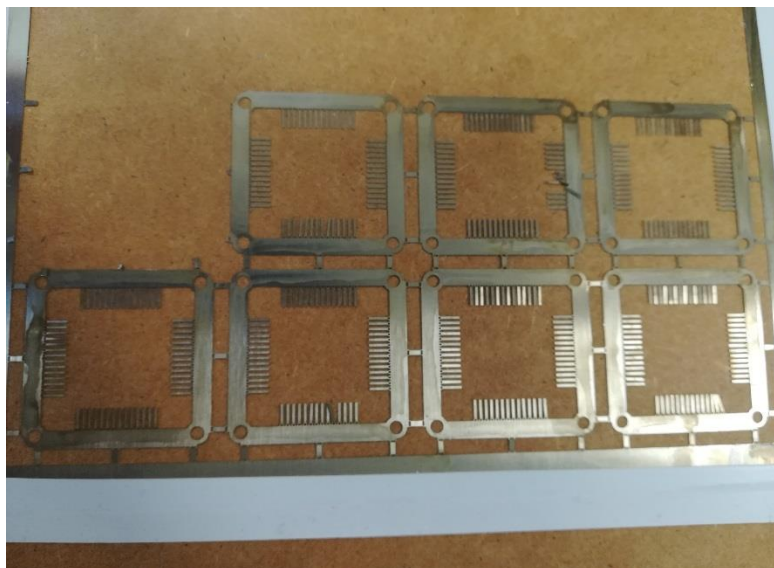
V praktické části se práce bude zabývat realizací tvrdého pájení s větší možností opakovatelnosti a nastavitelnosti pájecího procesu. Momentálně nepoužívanější metoda pájení pomocí plamene je z hlediska zajištění stejné kvality výsledných pájených spojů nedostatečná. U plamene je větší množství proměnných, jako je vzdálenost plamene od místa pájení, velikost nebo teplota použitého plamene. Současně je i přenos tepla pomocí radiace méně efektivní oproti přenosu kondukcí, používané u klasického měkkého pájení.

Při všech experimentech byla použita pevná pájka Ag45CuZn od společnosti SAFINA. Složení pájky je 45 % stříbra, 30 % mědi a 25 % zinku. Teplota tavení je 735°C. Pájka je ve formě drátu o průměru 2 mm, který je nevhodný pro pájení, proto bylo třeba pájku předem upravit. Úprava spočívala v nastříhání pájky na díly o délce 4 až 5 mm. Jednotlivé kousky byly poté pomocí kladiva naklepány, aby došlo k vytvoření rovné plochy, pro co nejlepší přestup tepla při pájení a lepší manipulaci (Obr. 6.).



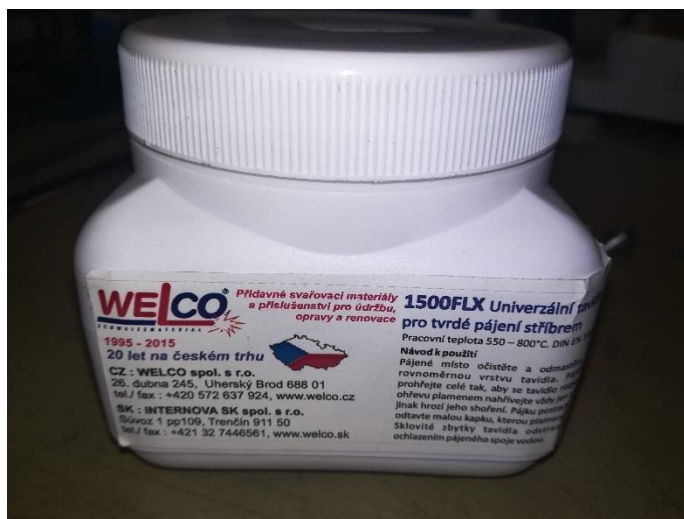
Obr. 6 Tvrdá pájka Ag45CuZn jako drát (vlevo) a upravená pájka (vpravo)

Jako vývody vhodné pro tvrdé pájení byly zvoleny vývody vytvořené z alpaky neboli bílé mosazi. Jde o slitinu převážně z mědi, niklu a zinku. Vývody mají šířku 0,6 mm. Pro lepší manipulaci a kvůli velikosti pájecích nástrojů byly ustříženy a pájeny tři najednou, přichycené k sobě pomocí rámu z alpaky (Obr. 7.).



Obr. 7 Vývody z bílé mosazi upevněné v rámu

Pro lepší přenos tepla a kvalitnější pájecí proces bylo použito univerzální tavidlo pro tvrdé pájení stříbrem 1500FLX s pracovní teplotou od 550°C do 800°C. Toto tavidlo bylo použito u všech pájecích procesů (Obr. 8.).



Obr. 8 Univerzální tavidlo pro tvrdé pájení stříbrem 1500FLX

4 POUŽITÉ PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ

V této kapitole budou představeny přístroje použité v praktické části bakalářské práce. Jsou popsány přístroje, které byly použity pro výrobu testovacího motivu, při pájecím procesu a při závěrečném testování.

4.1 Sítotiskový poloautomat AUREL C880 Screen Printer

Všechny testovací motivy byly vytvořeny na sítotiskovém poloautomatu AUREL C880 Screen Printer. Před natištěním tlustovrstvých past je třeba nastavit zařízení pro správnou kvalitu tisku. Síto s motivem vypnuté v hliníkovém rámě bylo uchyceno a vystředěno v držáku pod stěrku. Dále bylo třeba nastavit dostatečný odtrh a přítlak stěrky. Na závěr bylo třeba dodat potřebné množství správné pasty na síto, která byla následně protlačena stěrku na substrát pod sítem.

4.2 Sušárna Memmert UF 75

Substráty s natištěným tlustovrstvým motivem zůstaly 10 až 15 minut v klidu, kvůli levelingu. Po odležení byly pasty vysušeny v sušárně Memmert UF 75. Při sušení dochází k odstranění látek, které zlepšují vlastnosti při tisku, převážně jsou odpařovány organická ředidla těkavého charakteru. Na sušičce byla nastavena teplota 150°C a substráty byly vloženy dovnitř po dobu 15 minut.

4.3 Průběžná vypalovací pec BTU BUCR – 1

Po vysušení byly substráty vloženy do průběžné vypalovací pece BTU BUCR – 1. Pec obsahuje 4 různě nastavitelné teplotní zóny s maximální teplotou až 1100°C. Substráty jsou přepravovány po dopravníkovém pásu, jehož rychlost je nastavitelná od 2,5 až po 15 cm/min. V peci lze nastavit inertní atmosféru a na PC pak lze nastavit požadovaný teplotní profil. Pro použité pasty byl nastaven profil s vrcholovou teplotou 850°C a délkou 1 hodina.

4.4 Laboratorní proudový zdroj HCS

Laboratorní zdroj HCS je kvalitní a výkonný zdroj využívaný pro práci v laboratoři. Jeho největší výhodou je možnost nastavit vysoký výstupní proud až 60 A. V bakalářské práci byl použit jako zdroj napájení pro pájecí nástroje.

4.5 Keramická topná deska CT 10

Při pájení došlo k problémům s praskáním keramických substrátů Al_2O_3 z důvodu teplotního šoku. Pro zmenšení rozdílu teplot, po přiložení pájecího nástroje, byl substrát umístěn na topnou desku a vyhříván. CT10 také pomohla k předehtání pájeného spoje před samotným procesem pájení. Sklokeramickou plochu topné desky lze vytopit až na 500°C a dosahuje výkonu 1200 W. Zařízení bylo vyrobeno firmou Schott. Teplota je regulována pomocí řídicího systému od 10 do 100 % výkonu.

4.6 Měřič síly v tahu TEST 321

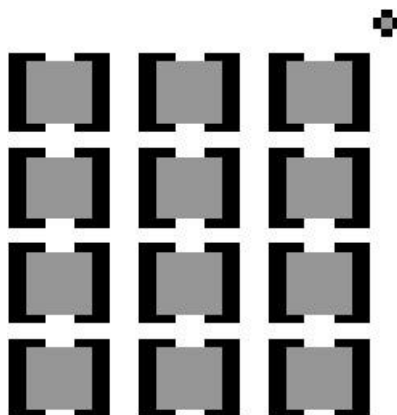
Pro změření pevnosti napájených vývodů bylo využito zařízení vytvořené panem Ing. Janem Valíčkem. Měřič TEST 321 byl zhotoven pro měření síly převážně u SMD součástek a BGA pouzder se silou v tahu až do 450 N. Vývody testovacího vzorku jsou upevněny k měřiči síly a nosný podklad je upevněn do pohyblivé konstrukci. Následně je oddalováním konstrukce až do utrhnutí vývodů zjištěna maximální tahová síla. U zařízení došlo ke ztrátě svorky připevněné k měřiči síly pro držení vývodů, proto byly objednány svorky nové. Byla vybrána jemná bodová svorka SAUTER AC 14 s pevností v tahu do 500 N a dlouhá svorka SAUTER AC 17 s pevností v tahu do 50 N, obě svorky od firmy Kern (Obr. 9.).



Obr. 9 Testovací svorky SAUTER AC 17 (nahore) a SAUTER AC 14 (dole)

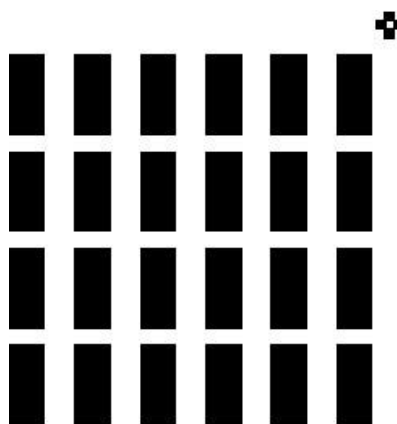
5 NÁVRH TESTOVACÍHO MOTIVU

Pro vyzkoušení a otestování pájeného spoje byl navržen testovací motiv. Zvolena byla rezistorová struktura, kterou lze podrobit jak výkonovým, tepelným, tak i mechanickým zatížením. Za podložku byl pak vybrán substrát Al_2O_3 (96%) schopnou snášet teploty až po 1700°C , který je běžně používán v tlustovrstvé technologii. Velikost nosného substrátu je 50,8x50,8 mm (2x2 palce). Výsledná rezistorová struktura je na Obr. 10.



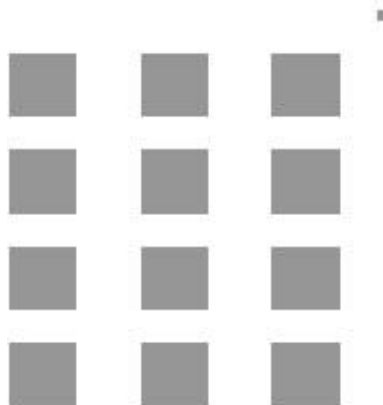
Obr. 10 První testovací motiv

Jako první byl vytvořen vodivý motiv plošek, pro který byla použita vodivá pasta na bázi stříbra a platiny, přesněji pasta od výrobce ESL typu 9695 – G. Příměs platiny pak zabrání, aby při pájení docházelo k odsmáčení. Vrstva pasty byla nanесena dvakrát, aby byl pájený spoj pevnější a zároveň došlo ještě více ke snížení efektu *leaching*. Vodivý motiv lze vidět na Obr.11.



Obr. 11 Vodivý motiv pro první návrh

Na odporovou vrstvu byla zvolena pasta typu TT 5011 s hodnotou rezistivity $10 \Omega/\square$. Jelikož na výkonové zatížení stačí relativně malý odpor, byla možnost udělat na substrátu větší množství vzorků na testování. Ukázku odporového motivu lze vidět na Obr. 12.



Obr. 12 Odporový motiv

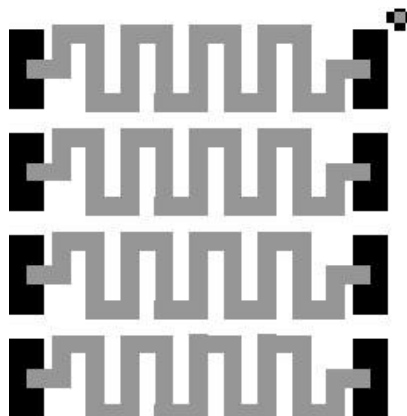
S velikostí odporové plochy $7 \text{ mm} * 3,5 \text{ mm}$ bude výsledný odpor jednoho vzorku 5Ω . Hodnotu odporu lze vypočítat následujícím vztahem

$$R = R_{ctverce} * \frac{l}{d}, \quad (2)$$

kde $R [\Omega]$ představuje celkový odpor, $R_{ctverce} [\Omega/\square]$ je hodnota odporu pasty na jeden čtverec, $l [\text{mm}]$ je délka odporového motivu mezi vodivými plochami a $d [\text{mm}]$ je šířka motivu.

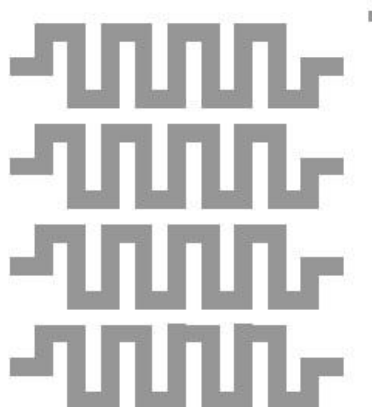
Z výsledků bakalářské práce pana Ing. Petra Neradila na téma Montáž vývodů pomocí tvrdých pájek na keramickém substrátu, lze odvodit, že při vyšším teplotním zatížení korundové keramiky dochází k jejímu praskání. Proto byl k otestování vlivu praskání vytvořen druhý testovací motiv. [12]

Změna od prvního testovacího motivu spočívá ve vytvoření meandru u odporové pasty, což by mělo vést ke zmírnění praskání nosného substrátu. Na rozdíl od pana inženýra Neradila [12], bylo místo dvou meandrů uděláno osm, aby šlo lépe pozorovat, jak velký vliv má tvar natištěné pasty na výsledné vlastnosti celého obvodu. Mělo by dojít převážně ve změně proudové hustoty, která bude větší než u předchozího odporového motivu, ale zase bude docházet k lepšímu odvádění tepla z obvodu. Ukázka druhého testovacího motivu na Obr. 13.

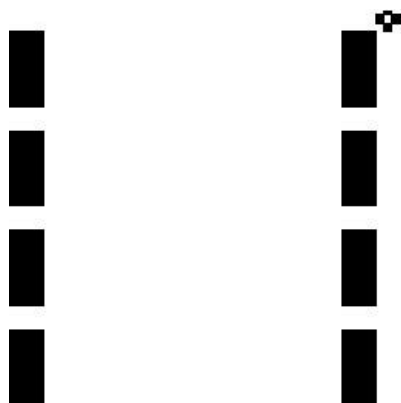


Obr. 13 Druhý testovací motiv

Aby šlo vytvořit dostatečný počet meandrů, tak bylo třeba použít pasta s malou rezistivitou. Tak byla na místo druhé odporové pasty zvolena AgPd 9695 – G, která má vhodnou rezistivitu $3,81 \text{ m}\Omega/\square$. Pasta je sice považována za vodivou, ale pro tuto aplikaci je vhodná. Výsledný motiv pak měl 50 čtverců, což odpovídá odporu $0,1905 \Omega$. Ukázka odporového motivu s meandry na Obr. 14 a vodivého motivu pro pájecí plošky na Obr. 15.



Obr. 14 Odporový motiv s meandry



Obr. 15 Vodivý motiv č. 2.

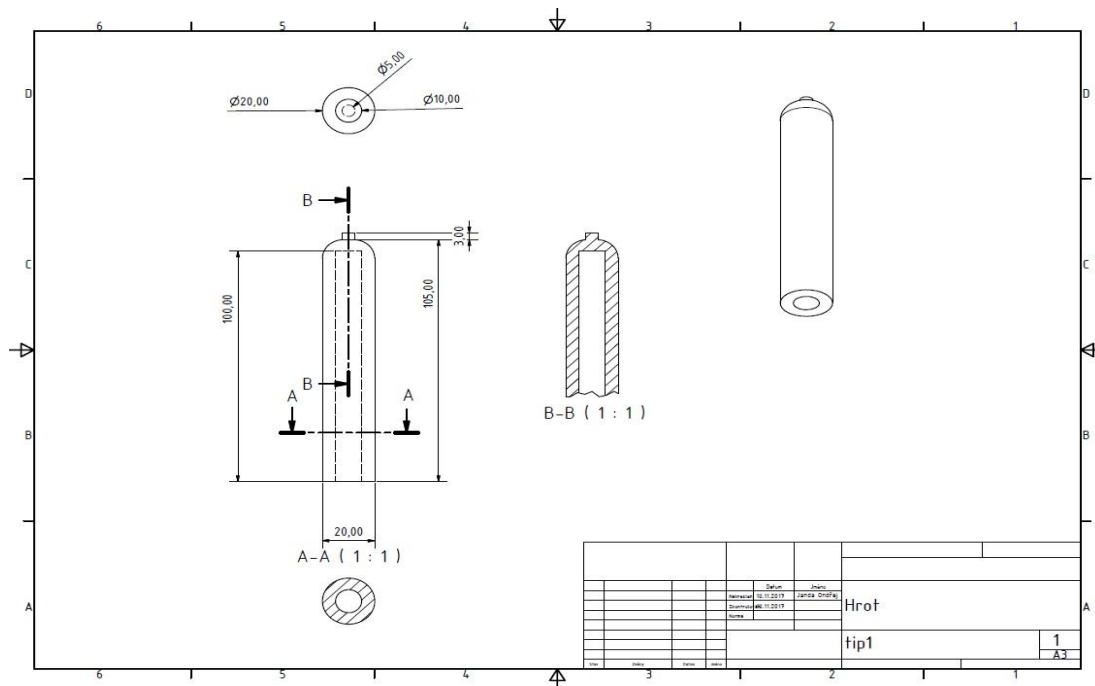
6 NÁVRH MĚDĚNÉHO PÁJECÍHO NÁSTROJE

V této kapitole je popsán prvotní návrh nástroje pro tvrdé pájení, který je pak dále rozvíjen.

Návrh nástroje pro tvrdé pájení předcházela volba metody přestupu tepla. Z bakalářské práce pana Petra Neradila [12] vyplývá, že využívání plamene pro pájení není dostatečně opakovatelné. Proto byla zvolena metoda přestupu tepla vedením.

Jelikož k pájení dojde při vysokých teplotách, tzn. zvolená pájecí slitina Ag45CuZn má teplotu tavení 735 °C, tak byl navrhnut mikropájkový nástroj pro tvrdé pájení. Klasické pájecí stanice na měkké pájení pro tyto potřeby nevyhovovaly, neboť jejich maximální dosažitelné teploty jsou pod 500 °C.

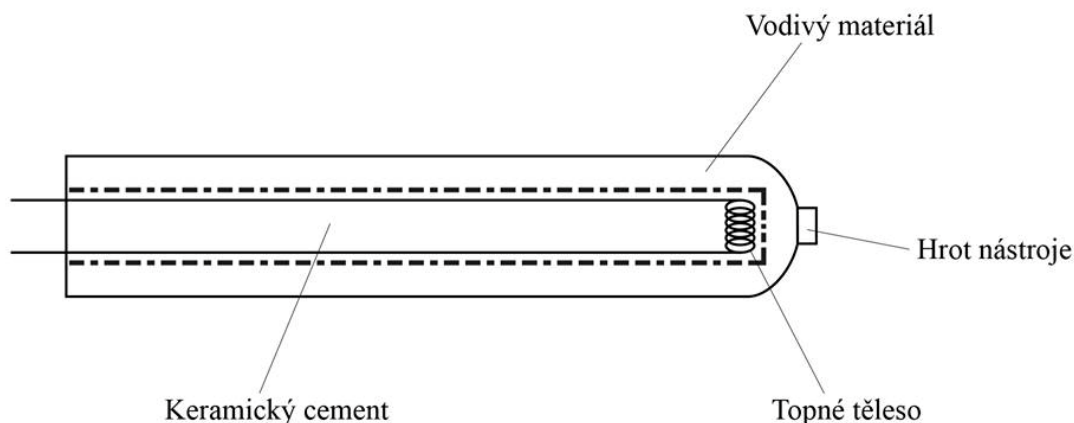
Jako nosný materiál byly zvažovány kovy jako mosaz nebo i dural, ale bohužel ani jeden z těchto materiálů nevyhovoval. Nakonec byla zvolena čistá měď kvůli své dobré tepelné vodivosti. Měď má i další vhodné vlastnosti jako vysoká teplota tavení, je dobře obrábitelná a její cena je stále relativně nízká. Ukázka prvotního návrhu nástroje na tvrdé pájení na Obr. 16.



Obr. 16 Prvotní návrh měděného nástroje na tvrdé pájení (není v měřítku)

Samotná měď samozřejmě nestačí, k nástroji je třeba přidat i zdroj tepla. V tomto případě bude zdroj tepla představovat topné těleso v podobě odporového drátu. Jako

odporový materiál byl vybrán kanthal, což je slitina železa, chromu a hliníku. Kanthal jako takový má teplotu tavení pohybující se až okolo 1300°C. Současně má dobré hodnoty odporu, od jednotek až po desítky ohmu na metr. Hodnota odporu i s hodnotou teploty tavení je rozdílná podle typu výrobce, tloušťky drátu a jeho poměrového složení. Kanthalový drát se vloží do vyvrtaného otvoru uvnitř nosného materiálu. Pro dosažení většího přenosu tepla na hrot nástroje, je třeba na konci drátu vytvořit topnou spirálu. Jelikož bude kanthalový drát připojen na elektrický zdroj a měď je elektricky vodivý materiál, musí být oba materiály vzájemně odizolované. Proto se vnitřek nosného materiálu i s drátem zaplní keramickým cementem OMEGABOND 600 od firmy Omega Engineering. Tento materiál je po vysušení tepelně vodivý, dokáže zvládat vysoké teploty a současně bude fungovat jako elektrický izolant. Schématické uspořádání lze vidět na Obr. 17. [13]

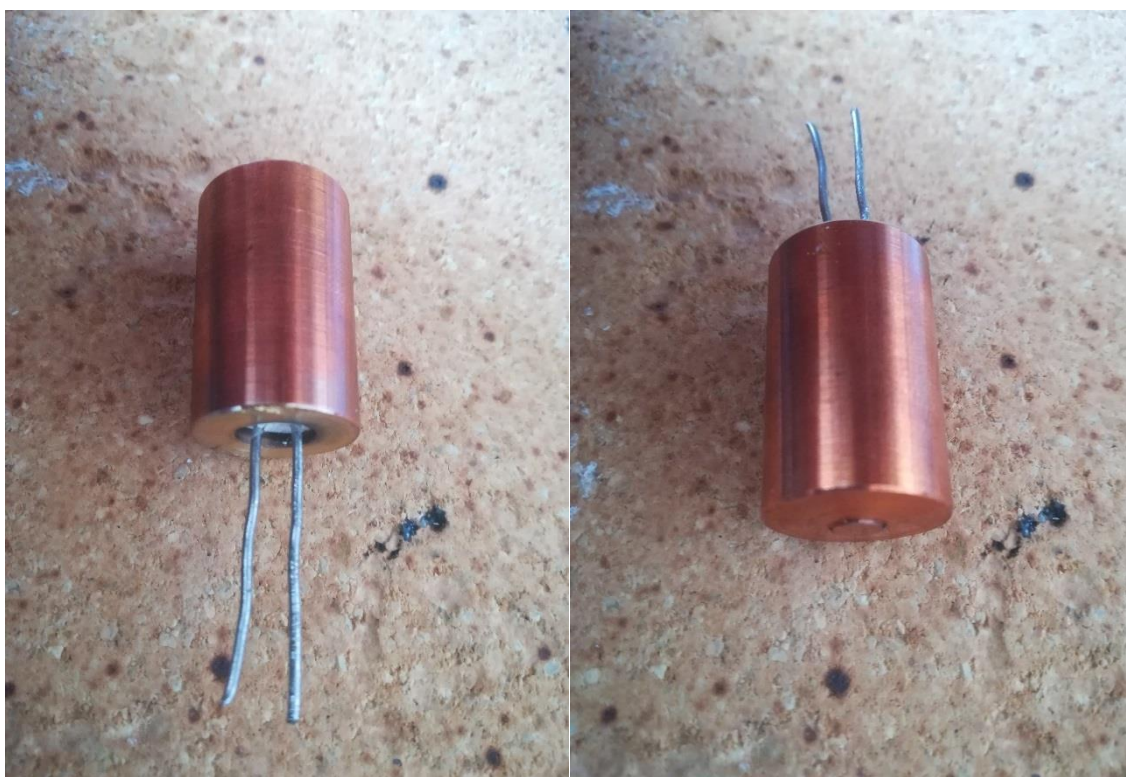


Obr. 17 Schématické uspořádání nástroje na tvrdé pájení

Dalším krokem je vytvoření ochranného povrchu na hrotu nástroje. Tento ochranný povrch je potřeba převážně, kvůli krytí mědi před korozí. Měď koroduje v plynném prostředí za vyšších teplot, kde společně se vzduchem vytváří na povrchu vrstvy oxidů. Zoxidování povrchu pájecího nástroje pak vede ke zhoršení podmínek při pájení. Zároveň bude úkolem materiálu zabránit mědi v rozpouštění do pájky. Pro povrchovou úpravu byly zvažované materiály jako nitrid titanu, nikl, stříbro, wolfram nebo chrom. Nakonec byl vybrán chrom a nikl. Oba prvky mají vyšší teploty tavení, takže zvládají teploty používané při tvrdém pájení. Chrom i nikl jsou běžně používané v průmyslových odvětvích jako ochrana před oxidací a zároveň zlepšují odolnost proti opotřebování. Zároveň je galvanické pokovení oběma materiály levné, oproti ostatním možnostem. Z těchto důvodů byla pro úpravu povrchu vybrána kombinace chrom-nikl. [14,15]

7 VÝROBA MĚDĚNÉHO PÁJECÍHO NÁSTROJE

Reálný pájecí nástroj byl vytvořen z měděného válce o průměru 3 cm, který byl opracován na soustruhu. Výsledný válec měl po opracování 1,9 cm průměr a 3,5 cm na délku. Na konci nástroje byla vytvořena tenká plocha o průměru 5 mm, pro co nejlepší přenos tepla při pájení. Do vyvrtaného otvoru byl vložen namotaný drát z kanthalu o velikosti odporu $0,256\ \Omega$ a tloušťce 1,2 mm. Vnitřek byl zalit keramickým cementem smíchaným s vodou. Nástroj byl poté vysušen a vypálen pro odstranění vlhkosti z cementu. Vytvořený nástroj lze vidět na Obr. 18.



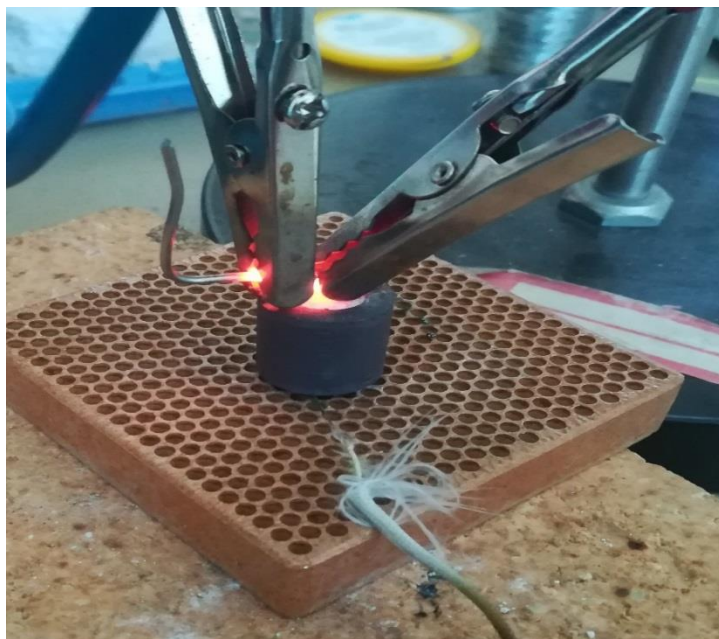
Obr. 18 Ukázka pájecího nástroje z mědi

Po vypálení došlo k pokusu nástroj vytopit na co nejvyšší teplotu, aby byla otestována jeho schopnost ohřevu na požadovanou pájecí teplotu. Nástroj byl připojen přes kanthalové dráty ke svorkám od zdroje a na hrot byl umístěn termočlánek pro snímání teploty (obr.19.). Bohužel po dosažení teploty 450°C na hrotu, došlo k přetavení kanthalové spirály vevnitř nástroje.



Obr. 19 Pokus o výhřev měděného nástroje

S teplotou nástroje na povrchu pouze 450°C musela být teplota samotného drátu mnohem vyšší, aby došlo k jeho přetavení. Z čehož lze usuzovat, že u nástroje zřejmě musela kanthalová spirála vyhřát velké množství materiálu a současně docházelo k příliš velkému ochlazování nástroje. Proto bylo kvůli dosažení vyšší teploty nástroje třeba změnit množství použitého materiálu. Došlo k odstranění další vrstvy mědi a průměr byl zmenšen na 1,5 cm, s tloušťkou měděné stěny 3 mm. Současně byl nástroj zkrácen o polovinu délky (Obr. 20.).

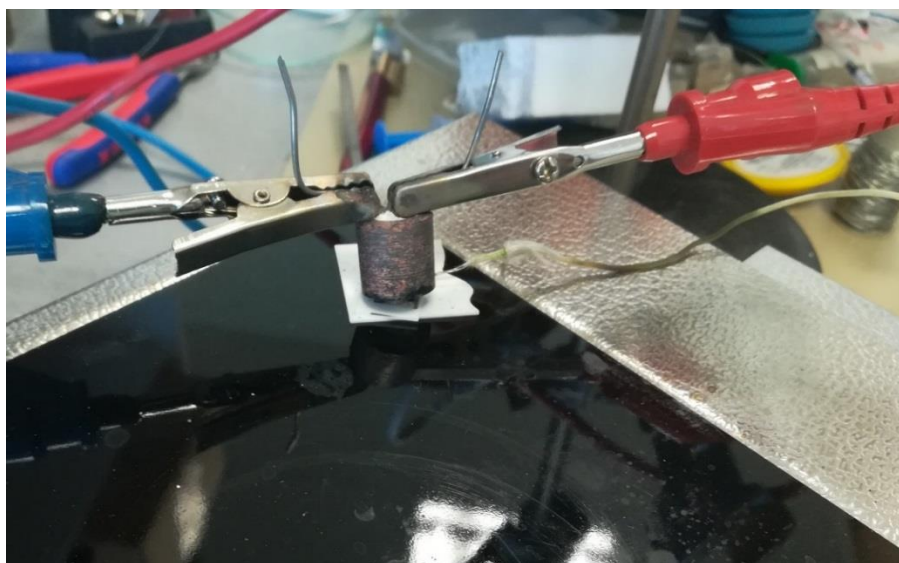


Obr. 20 Vyhřívání měděného nástroje po odebrání materiálu

Po zredukování množství mědi byl nástroj připojen na svorky proudového zdroje a došlo k pokusu ho vyhřát na požadovanou teplotu pro pájení, minimum 750 °C. Této teploty bylo při postupném zahřívání dosaženo při koncovém napětí 4,9 V a proudu 23,1 A. Současně byla při zahřívání u obou nástrojů vytvořena vrstva oxidů na povrchu mědi. K tvorbě vrstvy začalo při teplotě 200-300 °C. Po dosažení teploty 750 °C se vrstva oxidu ustálila na tmavě šedé barvě a dále už nedošlo k její změně. Po nanesení povrchové ochrany před oxidací na čistý hrot nástroje, může vrstva oxidů na stranách nástroje snížit rychlost ochlazování nástroje a soustředit většinu tepla převážně na hrot.

Proto byl tedy očištěn hrot nástroje od oxidů a došlo k nanesení vrstvy chrom-nikl o tloušťce 500 nm, která by měla zabránit další oxidaci. S nanesenou chrom-niklovou vrstvou došlo k prvnímu pokusu o zapájení pájky Ag45CuZn na vytvořené keramické substráty s tlustovrstvou vodivou pastou Ag-Pd.

Nástroj byl položený na pájce obalené tavidlem, pod kterou ležel testovací substrát. Současně byla snímána teplota přiloženým termočlánkem. Při zahřátí na přibližnou teplotu 350 °C ovšem došlo k rozlomení keramického substrátu na dvě poloviny. Toto prasknutí mohlo být způsobeno mikroprasklinami při lámání substrátu a velkým rozdílem teplot okolo substrátu. Problém byl vyřešen použitím výhřevné desky s maximální teplotou 500 °C, která zahřívala substrát ze spodní strany a snížila rozdíl teplot (Obr. 21.).



Obr. 21 Ukázka zapájení pájky na keramický substrát

Bohužel po dosažení teploty tavení došlo k natavení pájky na hrot pájecího nástroje (Obr. 22.). Důvodem byla velká smáčivost chrom-niklu při vysokých teplotách. Současně došlo i k tomu, že povrchová vrstva chrom-nikl z části difundovala do mědi kvůli vysoké teplotě. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto, že se přejde k jiným materiálům pro pájecí nástroj.



Obr. 22 Natavení pájky na hrot nástroje

8 PÁJECÍ NÁSTROJ Z NITRIDOVÉ KERAMIKY

Kvůli problémům souvisejícím s vysokou teplotou bylo rozhodnuto použít kontaktní nástroj vytvořený z nitridové keramiky (AlN). Byla použita destička ve tvaru obdélníku 2,5*1 cm, na kterou byla položena kanthalová spirála o hodnotě 0,21 Ω a poté byla zalita keramickým cementem OMEGABOND 600, lze vidět na obr. 23. Výhoda nitridové keramiky spočívá ve schopnosti vydržet vysoké teploty a oproti klasické korundové keramice nepraská z důvodu teplotního šoku.



Obr. 23 Pájecí nástroj z nitridové keramiky

Kanthal byl připojen ke zdroji a při napětí 5,1 V a proudu 24,2 A, došlo k vyhřátí destičky na teplotu 750 °C. Došlo k roztavení pájky, ale současně byl zničen přístroj. Kvůli teplotní roztažnosti změnil kanthal svoji délku, což vedlo k prasknutí keramického cementu držící nástroj pohromadě (Obr. 24.).



Obr. 24 Prasknutí keramického cementu po dosažení teploty přes 750 °C

9 PÁJECÍ NÁSTROJ Z NEREZOVÉHO MATERIÁLU

Jako poslední možnost byl zvolen pájecí nástroj vytvořený z nerezové oceli. Nerez by měla vydržet vysoké teploty a současně i částečně zvládá zabraňovat oxidaci při zvýšených teplotách. V tomto případě byl jako odporový materiál na vyhřívání využit samotný nerez. Principem tedy nástroj připomíná klasickou transformátorovou páječku. Bohužel hodnota rezistivity nerezů je velmi malá. Z tohoto důvodu došlo ke zmenšení tloušťky nástroje a nejtenčí část pak posloužila jako pájecí hrot. Nástroj byl poté vytvarován a upevněn pomocí šroubů k vodičům sloužících pro přívod proudu (Obr. 25.).



Obr. 25 Nerezový pájecí nástroj připevněný ke zdroji proudu

Jelikož je nástroj tvořen pouze z nerezového materiálu, lze ho vyhřívat mnohem rychleji než předchozí nástroje. U předešlých pájecích nástrojů bylo třeba čekat, než došlo k vyhřátí keramického cementu, který posléze předal teplo na hrot.

Nástroj byl při napětí 1,9 V a 44 A zahříván na teplotu 730 °C. Tato teplota byla změřena přiložením termočlánku, proto není úplně přesná. Měření termočlánku ovlivňuje velikost rozdílu mezi měřenou hodnotou a okolím, čím bude rozdíl vyšší, tím bude měření nepřesnější. Proto mohla být reálná teplota od 730 °C do 800 °C. V dalších experimentech bude udávána taktéž hodnota změřená termočlánekem, proto je třeba brát v úvahu, že uváděné teploty jsou minimální změřené hodnoty. Jelikož je hodnota odporu nerezového nástroje i s napájecími kabely okolo 43 mΩ, začal být problém s tepelnými ztrátami spojovacích drátů. Proto byly na napájení použity připojovací kabely s větší tloušťkou, 6 mm oproti předchozím s 4 mm, aby nedocházelo k jejich přílišnému zahřívání.

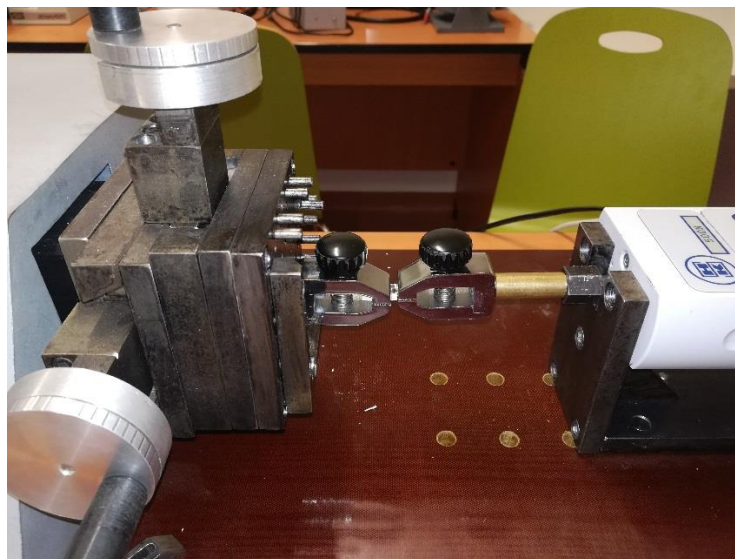
10 PÁJECÍ PROCES A TESTOVÁNÍ

V této kapitole je současně popsán postup v pájecím procesu a samotné testování. Tyto kapitoly byly sloučeny, protože při pájecím procesu byly vývody vždy zapájeny a poté došlo rovnou k jejich otestování. Následně byly zhodnoceny výsledky a byl navržen způsob pro zlepšení pájecího procesu pro vyšší kvalitu spoje.

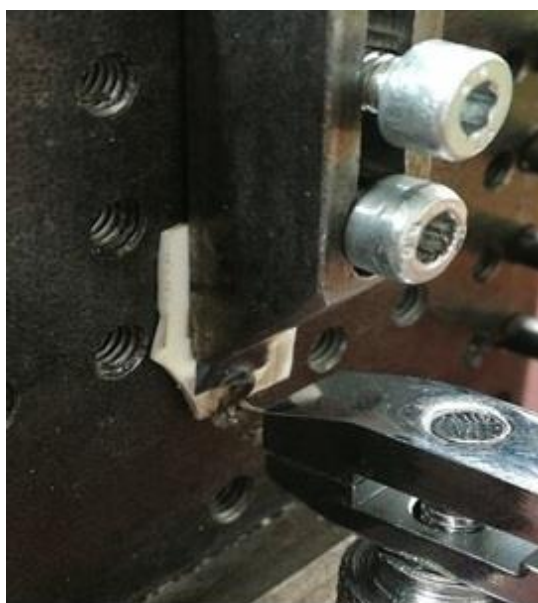
10.1 Návrh testování

Pro zhodnocení výsledku práce byly navrženy dva různé testy. První test byl tepelný, kdy pro simulaci výkonového zatížení byly připojeny testovací substráty k proudovému zdroji. Následně došlo k pouštění proudu přes tlustovrstvý odpor, což má za následek zahřívání celého substrátu. Teplota na substrátu byla po celou dobu testu měřena připojeným termočlánek typu K. Výkonové aplikace by měly splňovat minimální hodnoty, což znamená, že substrát by měl vydržet teploty okolo 500 °C. Největším problémem při tomto testu bylo praskání substrátu z korundové keramiky, které bývá způsobeno nerovnoměrným ohřevem a chybami v krystalové mřížce. Chyby v krystalové mřížce vznikají buď při výrobě substrátu (nečistoty) nebo při lámání substrátu na jednotlivé části. Praskání lze částečně zabránit, pokud je při testování substrát položen na vytápěnou desku, která kompenzuje nerovnoměrné rozložení teploty. Tímto způsobem lze dosáhnout sice vyšších teplot, ale zase nejsou přítomny testovací podmínky, které jsou u reálných aplikací, kde nemá každý obvod svůj vlastní zdroj tepla. Proto bylo rozhodnuto vyzkoušet metodu bez použití topné desky, pro zjištění maximální hodnoty teplotního zatížení pro reálné aplikace. [12]

Druhý test je zaměřen na otestování samotných vývodů a jejich mechanické pevnosti v tahu. Obvod byl pomocí napájených kontaktů přichycen na jedné straně a za substrát na straně druhé do zařízení na testování. Poté byla postupným oddalováním zjištěna síla potřebná k utržení vývodu, hodnota maximální možné mechanické zátěže, kdy dojde k destrukci spoje. Při testování mechanické pevnosti byla otestována síla spojů ve dvou směrech. V prvním případě byl substrát položen vodorovně se svorkami, tento způsob spíše odpovídá testům sřihové síly spoje. V tomto směru je spoj vždy nejpevnější, jelikož dochází k namáhání spoje silou, která je s ní v rovině (Obr. 26.). V druhém případě byl substrát uchycen kolmo ke svorkám a vývody byly otočeny směrem nahoru od substrátu. V tomto případě je potřeba nejmenší možná síla na destrukci spoje (Obr. 27.).



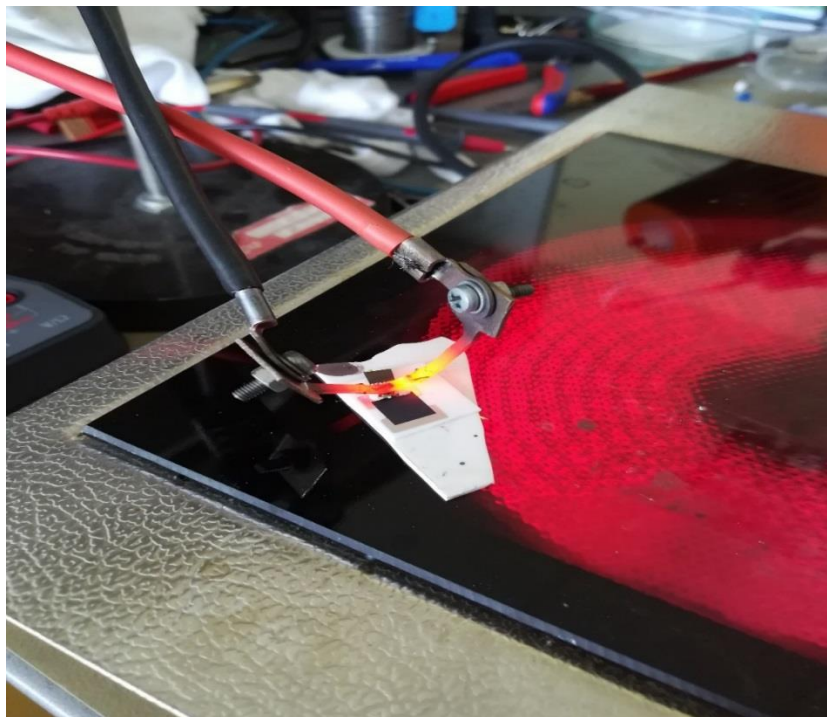
Obr. 26 Ukázka uchycení substrátu vodorovně při testu mechanické pevnosti



Obr. 27 Ukázka uchycení substrátu kolmo při testu mechanické pevnosti

10.2 Pájecí proces

K předehřátí při procesu tvrdého pájení byla použita topná deska vyhřátá na 500°C, opět pro snížení praskání korundové keramiky. Na vyhřátou desku byla položena keramická destička jako podložka. Na destičku byl poté umístěn odporový motiv s položenou pájkou a vývody. Pájka byla předem obalena v tavidle. Následně se vše nechalo nejméně 1 minutu předehřát. Ukázka rozestavění při pájení na obr. 28.



Obr. 28 Ukázka přiložení pájecího nástroje na předchystaný spoj

Poté byl pájecí nástroj připojen ke zdroji proudu. Na zdroji bylo nastaveno zmíněné napětí 1,9 V a proud 44 A, což vedlo k vyhřátí nerezů na měřenou minimální teplotu 730°C. Při zahřívání nástroje byla doba potřebná na vyhřátí nepatrná, kvůli malému množství materiálu potřebnému k vytopení. Kvůli tomuto důvodu došlo k vyhřátí nástroje do 4 až 5 sekund a poté byl přiložen na spoj pro zapájení. Tímto způsobem byly vytvořeny prvotní 4 spoje (Obr. 29.).



Obr. 29 První zapájené vývody

Jak lze vidět, spoje nejsou zrovna úhledné. Půlka vývodů je otočených, k tomu došlo z důvodu odpařování tavidla při přehřevu na topné desce. U tavidla došlo přibližně při teplotě 300 až 400 °C k vypařování a tvorbě malých bublin, což vedlo k posunutí rozestavení pájky a vývodů. Při bližším pohledu pod mikroskopem lze jasně vidět černé skvrny, které jsou vytvořeny oxidací při vysoké teplotě a tavidlovými zbytky (Obr. 30.). Většina skvrn lze případně očistit. Po změření multimetrem bylo ověřeno, že spoj je elektricky vodivý.



Obr. 30 Ukázka prvotního pájeného spoje pod mikroskopem

Dalším krokem bylo otestování prvních vzorků. Došlo k uchycení za rám (obr. 30. vpravo) držící vývody. Bohužel při prvním pevnostním testu došlo k oddělení spojů velmi malou silou, okolo 2 N. Ve všech případech byl spoj zničen odtržením od substrátu. Při pohledu na zničený spoj pod mikroskopem, lze vidět, že došlo z velké části k odsmačení vodivé tlusté vrstvy (Obr. 31.).



Obr. 31 Bližší pohled na vývod po odtrhnutí

K jevu *leaching* došlo i přes dvojitou vrstvu nanesené vodivé vrstvy AgPd. *Leaching* lze omezit snížením času pro pájení nebo zlepšením přenosu tepla. Současně musí být doba dotyku nástroje dostatečná, aby došlo k vytvoření spoje.

Přibližně po 15 pokusech o zapájení došlo ke značné oxidaci celého nástroje. Materiál začal degradovat, převážně ve zúženém místě pro pájení, kde byla koncentrace tepla největší. Proto byly vytvořeny další 3 nástroje. Současně byl vybrán titan nitrid pro zlepšení ochrany nástrojů před oxidací. Byl vytvořen nerezový držák pro upevnění nástrojů v napařovací komoře. Následně došlo k napaření 500 nm titan nitridové vrstvy na nerez (Obr. 32.).



Obr. 32 Nerezové pájecí nástroje s napařenou titan nitridovou vrstvou

Po vyhřátí nového nástroje došlo bohužel opět k oxidaci. Oproti předchozímu pokusu byla ovšem oxidace soustředěna pouze na střed nástroje s nejtenčím průměrem

a jeho blízké okolí. Oxidace byla teda omezena na pájecí hrot, kde byla přítomna nejvyšší teplota.

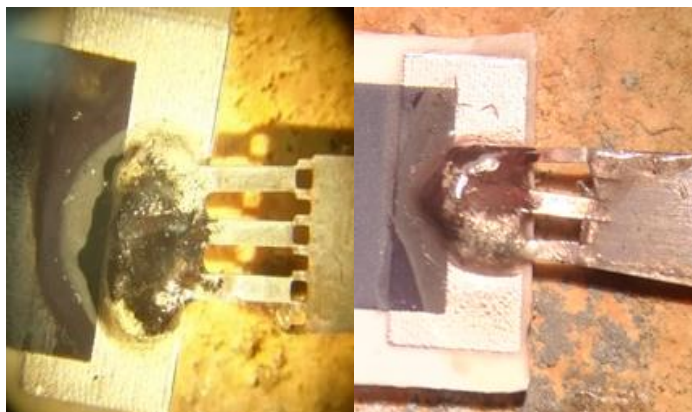
Pro zmenšení vlivu odsmačeni vodivé tlusté vrstvy, bylo použito větší množství tavidla. Bylo naneseno tavidlo na samotnou vodivou plochu, dále byla v tavidle obalena pájka a konce vývodů. Současně byly při vyhřívání substrátu na topné desce použity pinzety, pomocí kterých byly při odpařování tavidla přidrženy vývody a pájka na správném místě. Oproti předchozímu pokusu došlo ke zmenšení doby pájení z 15 až 20 sekund na 12 až 14. Kvůli tomuto rozdílu by měl být projev odsmačeni menší.

Spoje byly podrobeny střižové pevnostní zkoušce. Došlo ke zvýšení změřených hodnot z 2 N na 8 až 14 N. Při měření bylo zjištěno, že spoje s nižší dobou pájení dosahují vyšších hodnot. Z toho lze usoudit, že projev odsmačeni je i nadále velkým faktorem ovlivňující kvalitu spojů. Byla otestována i možnost položit při pájení pájku na vývody, aby došlo k lepšímu přestupu tepla. Doba pájení se ovšem zkrátila nepatrně a spoje měly horší kvalitu kvůli špatnému přístupu pájky pod vývody.

Pro další zlepšení kvality došlo tedy ke zvýšení teploty nástroje. S hodnotou napětí 2,1 V a proudem 46 A byla na nástroji změřena termočlánkem teplota 780°C. S touto novou hodnotou bylo poté pájeno stejným způsobem. Zvýšená teplota měla za následek, že došlo ke snížení doby pájení na 4 až 7 sekund, což by mělo značně snížit vliv odsmačeni na pevnost spoje.

Při testování spojů došlo k problému s uchycením v držících svorkách. Z důvodu malé velikosti vývodů, jak z hlediska délky, tak tloušťky. Došlo vždy k utrnutí držícího rámu, ke kterému byly vývody uchyceny. Na utrnutí byla potřeba síla od 20 N do 30 N. Následně došlo k pokusu upevnit vývody přímo, ale i při dotažení svorek pomocí kleští došlo k vysmeknutí vývodů. Největší změřená síla potřebná k vysmeknutí vývodů byla 55,9 N.

Z tohoto důvodu byly vytvořeny z alpaky vývody nové. Změna oproti předchozím byla v uchycení vývodu souvislou plochou, rozdíl lze vidět na obr. 33.



Obr. 33 Rozdíl mezi vývody původními (vlevo) a upravenými (vpravo)

S touto úpravou byly stejným způsobem vytvořeny nové spoje. U následného testování nedošlo k problémům s vysmeknutím, proto byly změřeny hodnoty destrukční síly jak pro vodorovné (stříhová síla) tak pro kolmé (tahová síla) umístění substrátu. Přehled hodnot lze vidět v tabulce 2.

Tab. 2 Naměřené hodnoty síly pro spoje se třemi vývody

Druh testu	Maximální hodnota síly [N]			Průměrná síla [N]
Tahová síla	8,6	6,1	7,4	7,37
Stříhová síla	94,1	93,2	97,7	95

U měření tahové síly došlo ve všech případech k oddělení v místě kontaktu vodivé vrstvy se substrátem. V případě použité vodivé vrstvy AgPd, která byla vypálena při teplotě 850°C, což je relativně blízko s použitou pájecí teplotou. Malý rozdíl mezi těmito teplotami mohl mít za důsledek zhoršení vazby mezi substrátem a spojem, což mohlo ovlivnit testování a snížit výsledné hodnoty při zkoušce. Problém lze vyřešit použitím vodivé pasty s vyšší vypalovací hodnotou, ale zároveň by měla mít schopnost snížit vliv jevu *leaching*.

Stříhová síla byla pro destrukci spoje relativně vysoká, v porovnání s tloušťkou vývodů. Ve dvou případech došlo k prasknutí samotného substrátu a v jednom došlo k roztrhnutí vývodů. Proto byl vytvořen prodloužený vývod o stejné tloušťce 0,6 mm, pro změření maximální hodnoty tahové síly samotného vývodu. Síla potřebná k destrukci byla 37 a 40 N. Prasknutí substrátu pak mohly způsobit chyby a mikropřaskliny ve struktuře substrátu nebo rozdíl ve výšce upevňovacích svorek. Tento rozdíl vznikl kvůli pájce potřebné k zapájení mezi vývody a substrátem.

Pro srovnání, vývody ve tvaru L (angl. *Gull Wing*) s tloušťkou 0,5 mm pájené měkkou pájkou, mají pevnost při odtrhnutí pod úhlem 45° okolo 7,5 až 15 N. Síla je pak odlišná s rozdílným typem pájky nebo druhem povrchového ošetření DPS. Současně je třeba mít na paměti, že testování při úhlu 45° vykazuje vyšší hodnoty oproti kolmému, které bylo použito. [16]

10.3 Tepelný test

Na závěr byly tepelně otestovány oba motivy substrátů. Pro test byl použit testovací motiv bez napájených vývodů, jelikož substrát praská při mnohem nižších teplotách, než je tepelná odolnost spojů. Byl porovnáván, jaký vliv má na praskání substrátů rozdíl rozložení odporového motivu. Oba substráty byly připojeny na zdroj proudu a na spodní část byl umístěn termočlánek pro snímání teploty ve středu (Obr. 34.).



Obr. 34 Připojení obou substrátů při zátěžovém testu

Oba substráty byly poté pomalu zahřívány s přibližnou hodnotou 5 °C/s. Nárůst teploty byl pomalý, aby došlo k dostatečnému prohřátí substrátu. Pro oba motivy byly otestovány tři vzorky. Motiv ve tvaru obdélníku prasknul při teplotách 330 °C, 335 °C a 340 °C, ve středu destičky. U druhého motivu s meandrem ovšem došlo k prasknutí až při teplotách 630 °C, 680 °C a 700 °C. Tedy rozdíl v hodnotě destruktivní teploty byl až dvojnásobný. V praskání substrátů hraje roli několik faktorů. V první řadě je nejdůležitější tepelné zatížení a teplotní šok s vlivem okolního prostředí. Důkladné vyhřátí substrátu také může znatelně zvýšit teplotu prasknutí. Dále záleží na velikosti a tloušťce substrátu, větší a tlustší jsou více náchylnější k praskání. Jako poslední faktor je třeba zmínit samotnou strukturu korundové keramiky, ve které můžou při neopatrné manipulaci nebo neodborném řezání vznikat mikropřaskliny. [17]

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala aplikací tvrdých pájek na tlustovrstvou technologii. Tato kombinace je v dnešní době málo prozkoumaná, jednotlivé metody pájení nejsou vhodné nebo jsou finančně velmi náročné. V teoretické části byla uvedena rešerše na téma tlustých vrstev, fyzikálních jevů při pájení a na téma tvrdé pájení, speciálně na pájky na bázi stříbra.

V druhé části pak byl nastíněn způsob pájení při využití tvrdé pájky. Byly vybrány vývody, pájka, odporová a vodivá pasta. Klasické pájecí stanice nevyhovovaly, jelikož je potřeba dosáhnout teploty pohybující se okolo 800 °C. Proto byly navrženy a sestrojeny různé typy nástrojů. U většiny nástrojů vznikaly problémy s jejich funkčností při vysokých teplotách, převážně kvůli oxidaci. Měděný nástroj v provedení, které bylo vytvořeno, by mohl být použitelný, ale bylo by třeba vybrat pro hrot vhodnou ochranou vrstvu, která by bránila oxidaci a zároveň měla menší smáčivost než použitý chrom-nikl. U keramického nástroje oxidace neprobíhala a současně byl vyhříván rychleji než měď. Nevýhoda nástroje byla ve volbě materiálu pro spojení odporového drátu a keramiky. Použitý vysokoteplotní cement nebyl pro tuto aplikaci vhodný. Finální nástroj z nerezového materiálu byl nejvhodnější. I přes oxidaci nástroje se povedlo postupnou úpravou pájecího procesu vytvořit, z hlediska pevnosti, odolné spoje. Oxidace v tomto případě byla spíše problémem kvůli degradaci pájecího nástroje než při samotném procesu pájení. Pro spolehlivější pájecí nástroj by mohla stačit lepší ochranná vrstva než použitý titan nitrid, případně větší tloušťka než 500 nm. Pro správnou volbu ochranné vrstvy je třeba dalšího výzkumu.

U pájecího procesu byl největší problém s odsmáčením, tzv. *leaching*, který však byl však omezen použitím dvojité vrstvy vodivé past AgPd a snížením doby pro pájení. Výsledné hodnoty pevnostních zkoušek jsou v porovnání se spoji pájenými měkkou pájkou vyšší. Lepších hodnot lze dosáhnout pomocí použití pájky ve formě pasty, která je lépe aplikovatelná. Změna tlustovrstvé pasty s vyšší teplotou výpalu by také mohla zlepšit pevnost spojů.

Na závěr bylo provedeno testování praskání substrátů z 96% korundové keramiky, kdy byl ověřen vliv teploty v návaznosti na rozložení proudové hustoty. Z výsledků pozorování lze odvodit, že i s větší proudovou hustotou lze zabránit praskání substrátu. Měření ukázalo, že substrát s meandry odolal praskání až do teploty 700 °C, což je 2krát větší hodnota než u druhého substrátu (340 °C).

LITERATURA

- [1] SZENDIUCH, I. *Mikroelektronické montážní technologie*, Brno: VUT IUM, 1997.
- [2] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*, Brno: VUT IUM, 2006.
- [3] Packaging materials [Online]. Kyocera International, Inc, 2015 – [cit. 29. listopad 2017]. Dostupné na <https://americas.kyocera.com/kai-semiparts/packaging/by-material/>.
- [4] Aluminum Oxide, Al₂O₃ Ceramic Properties [Online]. Accuratus Corporation, 2013 – [cit. 29. listopad 2017]. Dostupné na <http://accuratus.com/alumox.html>.
- [5] KOHOUTOVÁ, P. *Substráty pro výkonové elektronické aplikace*. Bakalářská práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2013.
- [6] JEŽEK, V. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje*. Diplomová práce. Brno: VUT FEKT, 2015.
- [7] RUŽA, I. *Pájení*, Praha: SNTL, 1988.
- [8] Sayut, M. A KOLEKTIV. Manufacturing and properties of quartz sio2 particulate reinforced al 11 8 si matrix composites [Online]. Intechopen, 2012 – [cit. 3. prosinec 2017]. Dostupné na <https://www.intechopen.com/books/composites-and-their-properties/manufacturing-and-properties-of-quartz-sio2-particulate-reinforced-al-11-8-si-matrix-composites>.
- [9] SZENDIUCH, I. A KOLEKTIV. *LABORATORNÍ CVIČENÍ – Pájení, optická kontrola a měření teplotního profilu*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2015.
- [10] NEUMANN, H. Technologie I., Pájení [Online]. Technická univerzita v Liberci, Katedra strojírenské technologie – [cit. 26. 11. 2017]. Dostupné na www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvicieni13_prezetace.pdf.
- [11] Yu Kyoung Kim, A KOLEKTIV. The Effects of Adding Elements of Zinc and Magnesium on Ag-Cu Eutectic Alloy for Warming Acupuncture [Online]. Researchgate, 2013 – [cit. 8. prosinec 2017]. Dostupné na https://www.researchgate.net/publication/257206353_The_Effects_of_Adding_Elements_of_Zinc_and_Magnesium_on_Ag-

Cu_Eutectic_Alloy_for_Warming_Acupuncture.

- [12] NERADIL, P. *Montáž vývodů pomocí tvrdých pájek na keramickém substrátu*. Bakalářská práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014.
- [13] Kanthal - Mechanické a fyzikální vlastnosti drátu [Online] KNTL a.s., 2014 – [cit. 13. prosinec 2017]. Dostupné na www.kntl.cz/getFile/case:show/id:17737.
- [14] Chrome plating: A guide for selecting the type of chrome plating for use in contact with Bal Seal spring-energized seals in rotary and reciprocating service. [Online]. Bal Seal. 2015 – [cit. 13. prosinec 2017]. Dostupné na https://www.balseal.com/sites/default/files/TR-14_revision_G.pdf.
- [15] KŘENKOVÁ, P. *Antikorozní ochrana kovů a povrchové úpravy*. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín, 2006.
- [16] Young Woo Lee, Ki Ju Lee, Norman Zhou, Jae Pil Jung. Characteristics of Sn8Zn3Bi solder joints and crack resistance with various PCB and lead coatings. [Online]. Science Direct. 2008 – [cit. 24. květen 2018]. Dostupné na <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271407004556>.
- [17] Dov Sherman, Doron Schlumm. Thickness effect in thermal shock of alumina ceramics [Online] Scripta Materialia. 1999 – [cit. 24. květen 2018]. Dostupné na https://www.researchgate.net/publication/240390687_Thickness_Effect_in_Thermal_Shock_of_Alumina_Ceramics.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Závislost velikosti intermetalické vrstvy na teplotě a času. [6].....	10
Obr. 2 Pevnost intermetalické vrstvy v závislosti na její tloušťce [6].....	11
Obr. 3 Znázornění špatné a dobré smáčivosti. [8]	12
Obr. 4 Ukázka jevu leaching tlustovrstvé stříbrné pasty do pájky. [9].....	13
Obr. 5 Diagram teplot slitin Ag – Cu [11]	15
Obr. 6 Tvrdá pájka Ag45CuZn jako drát (vlevo) a upravená pájka (vpravo)	17
Obr. 7 Vývody z bílé mosazi upevněné v rámu.....	18
Obr. 8 Univerzální tavidlo pro tvrdé pájení stříbrem 1500FLX	18
Obr. 9 Testovací svorky SAUTER AC 17 (nahore) a SAUTER AC 14 (dole).....	20
Obr. 10 První testovací motiv	21
Obr. 11 Vodivý motiv pro první návrh	21
Obr. 12 Odporový motiv	22
Obr. 13 Druhý testovací motiv	23
Obr. 14 Odporový motiv s meandry	23
Obr. 15 Vodivý motiv č. 2.	24
Obr. 16 Prvotní návrh měděného nástroje na tvrdé pájení (není v měřítku)	25
Obr. 17 Schématické uspořádání nástroje na tvrdé pájení.....	26
Obr. 18 Ukázka pájecího nástroje z mědi	27
Obr. 19 Pokus o výhřev měděného nástroje	28
Obr. 20 Vyhřívání měděného nástroje po odebrání materiálu.....	28
Obr. 21 Ukázka zapájení pájky na keramický substrát.....	29
Obr. 22 Natavení pájky na hrot nástroje	30
Obr. 23 Pájecí nástroj z nitridové keramiky	31
Obr. 24 Prasknutí keramického cementu po dosažení teploty přes 750°C	31
Obr. 25 Nerezový pájecí nástroj připevněný ke zdroji proudu.....	32
Obr. 26 Ukázka uchycení substrátu vodorovně při testu mechanické pevnosti	34
Obr. 27 Ukázka uchycení substrátu kolmo při testu mechanické pevnosti	34

Obr. 28 Ukázka přiložení pájecího nástroje na předchystaný spoj	35
Obr. 29 První zapájené vývody.....	36
Obr. 30 Ukázka prvotního pájeného spoje pod mikroskopem.....	36
Obr. 31 Bližší pohled na vývod po odtrhnutí.....	37
Obr. 32 Nerezové pájecí nástroje s napařenou titan nitridovou vrstvou.....	37
Obr. 33 Rozdíl mezi vývody původními (vlevo) a upravenými (vpravo)	38
Obr. 34 Připojení obou substrátů při zátěžovém testu	40

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání vlastností anorganických substrátů [2,3,4,5].....	8
Tab. 2 Naměřené hodnoty síly pro spoje se třemi vývody	39

SEZNAM VZORCŮ

Rovnice 1 Výpočet smáčecího úhlu θ [5]	12
Rovnice 2 Výpočet celkového odporu pasty	22

SEZNAM SYMBOLŮ, ZKRATEK A VELIČIN

R	Odpor
$R_{\text{čtverce}}$	Odpor jednoho čtverce pasty
l	Délka
d	Šířka
θ	Smáčecí úhel
γ_{sl}	Mezipovrchová energie mezi pájeným materiálem a pájkou (solid a likvid)
γ_{sv}	Mezipovrchová energie mezi pájeným materiálem a okolní atmosférou (solid a vapor)
γ_{lv}	Mezipovrchová energie mezi pájkou a okolní atmosférou (likvid a vapor)
Al_2O_3	Korundová keramika
BeO	Oxid berylia
SiC	Silikon karbid
BN	Nitrid boru
AlN	Nitrid hliníku
TLV	Tlustá vrstva
Ag	Stříbro
Cu	Měď
Ni	Nikl
Pd	Paladium
Al	Hliník
Zn	Zinek
Sn	Cín
Si	Křemík
P	Fosfor
Mn	Mangan
Fe	Železo

Sb	Antimon
Bi	Bismut
Pb	Olovo